

Copyright © 2022 by Cherkas Global University



Published in the USA
 Russian Journal of Astrophysical Research. Series A
 Has been issued since 2015.
 E-ISSN: 2413-7499
 2022. 8(1): 32-39

DOI: 10.13187/rjar.2022.1.32
<https://rjar.cherkasgu.press>



Study of the "Earth-Moon" System

Viktor P. Savinykh ^{a, b, *}

^a Moscow State University of Geodesy and Cartography, Russian Federation

^b Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky (RACT), Russian Federation

Abstract

The article examines the system of two bodies "Earth Moon". It is shown that, like any system of physical bodies, this system has a common center of mass or barycenter. The Earth and the Moon revolve around the barycenter. The incorrectness of the statement that the Moon revolves around the Earth is noted. The moon revolves around the common center of mass of the system, which is displaced with respect to the center of mass of the Earth, but is located in the body of the Earth. The parameters of the bodies' orbits in the Earth-Moon system are estimated. It is hypothesized that the ebb and flow occur due to the daily rotation of the Earth and the displacement of the center of the water mass relative to the barycenter. The phenomenon of libration points in the Earth-Moon system is described. Stable and non-stable libration points are described. Calculations of libration points in the Earth-Moon system and the associated Sun-Earth system have been carried out. The expediency of using libration points for the construction of space stations is noted. It is hypothesized that the libration points of the Sun-Earth system can contribute to the formation of debris rings in near-Earth space.

Keywords: space research, Earth, Moon, orbital parameters, barycenter, libration points, Sun Earth system.

1. Введение

Особенностью исследования космических объектов является их взаимосвязь. Объекты влияют друг на друга и тяжелые объекты влияют на малые и на траектории пролетающих космических тел. В космосе нет независимых тел. По существу, в космосе существуют системы связанных тел. Одной из таких систем является система «Земля-Луна», которая существенно влияет на жизнедеятельность человечества (Jorba-Cuscó, 2018). Анализ большинства систем начинается с их структуры. Анализа пространственных отношений и пространственных взаимодействий. В современных условиях компьютерного моделирования пространственных процессов пространственные взаимодействия моделируют информационными взаимодействиями. Кроме того, удобной формой описания пространственных процессов является модель информационной ситуации (Цветков, 2017). При космических исследованиях динамики информационная ситуация выполняет функции фотоснимка фиксирующего состояние объектов на определенный период времени. Это позволяет проводить анализ дальнейшего поведение объектов или пространственных систем типа «Земля-Луна».

* Corresponding author
 E-mail addresses: president@miigaik.ru (V.P. Savinykh)

2. Результаты

Динамика системы «Земля-Луна»

Во многих научно-популярных справочниках и даже в некоторых учебниках говорится, что Луна вращается вокруг Земли. Это неточность. Из курса физики известно, что любая связанная система из двух и более тел имеет общий центр масс. В система Земля Луна (СЗЛ) общий центра масс СЗЛ (барицентр) (Тихонов, Неверов, 2015) располагается примерно в $R_b=4700$ км от центра масс Земли. Луна вращается вокруг этого центра масс. Более точное выражение звучит так: Луна вращается вокруг общего с Землей центра масс или барицентра, который удален от центра Земли на 4700 км.

Каждый оборот занимает 27,3 земных суток и называется сидерическим месяцем. В среднем Луна удалена от центра Земли примерно на 60 земных радиусов, что составляет 384405 км. На [Рисунке 1](#) приведена схема СЗЛ.

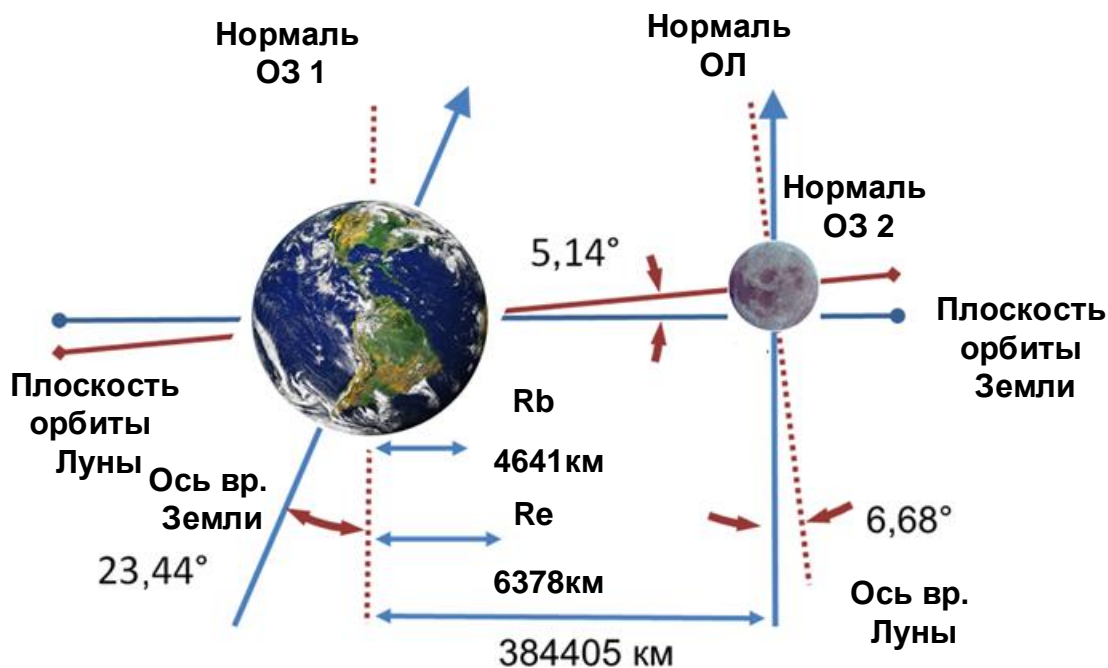


Рис. 1. Система Земля-Луна в орбитальном аспекте

На [Рисунке 1](#) показано что орбита Луны наклонена на $5,14^\circ$ по отношению к плоскости орбиты Земли. К плоскости орбиты Земли можно провести две нормали. Одна нормаль (нормаль ОЗ1) проходит через центр масс Земли вторая нормаль (нормаль ОЗ2, [Рисунок 1](#)) проходит через центра масс Луны. Расстояние между нормальями характеризует расстояние между центрами Земли и Луны. Ось вращения Земли отклонена от нормали ОЗ1 на $23,44^\circ$. Ось вращения Луны отклонена от нормали ОЗ2 на $-6,68^\circ$. Условная точка пересечения осей вращения Луны и Земли имеет координаты 35446 км от центра масс Земли и 81754 км по нормали к плоскости орбиты Земли. Луна вращается вокруг барицентра по эллипсу с параметрами приведенными на [Рисунке 2](#).

Средний эксцентриситет орбиты луны равен 0,0549006. Это дает основание считать ее близкой к круговой.



Рис. 2. Параметры орбиты Луны

Движение в системе Земля – Луна показано на [Рисунке 3](#). Общий центр масс СЗЛ или барицентр обозначен БЦ. Центр масс Луны обозначен ЦМЛ. Центр масс Земли обозначен ЦМЗ. На рисунке показаны направления вращения Земли и Луны вокруг своих осей. Пунктиром обозначено вращение центра масс Земли вокруг барицентра.

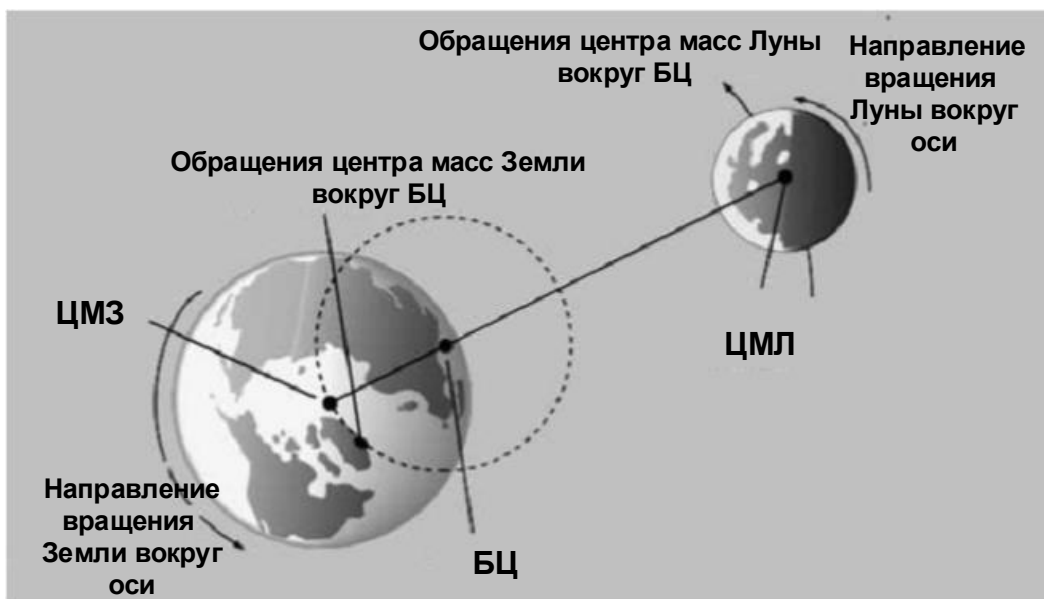


Рис. 3. Движение в системе Земля – Луна

Следует отметить еще одну особенность. В некоторых справочниках утверждают, что приливы и отливы проходят под влиянием Луны. Это неточно. Луна влияет, но посредством барицентра. Приливы происходят при вращении Земли вокруг своей оси, но с учетом влияния барицентра.

Точки либрации в системе «Земля-Луна»

В СЗЛ имеются феномены, связанные с движением Земли и Луны. К ним относятся точки Лагранжа ([Erdos, Turán, 1938](#); [Tyson, 2002](#); [Jantsch et al., 2019](#)), которые также называют точками либрации ([Capdevila, Howell, 2018](#)). Рассмотрим динамическую

информационную ситуацию, для которой космический аппарат (КА) находится на линии, соединяющей Землю и Луну (Рисунок 4). При движении по этой линии на КА действует притяжение Земли, притяжение Луны и центробежное ускорение, обусловленное вращением линии. Можно выдвинуть гипотезу, что существует точка, в которой эти три ускорения обнуляются. Выяснилось, что такие очки существуют в СЗЛ и таких точек пять (Рисунок 4). их назвали точками либрации и обозначают символом L.

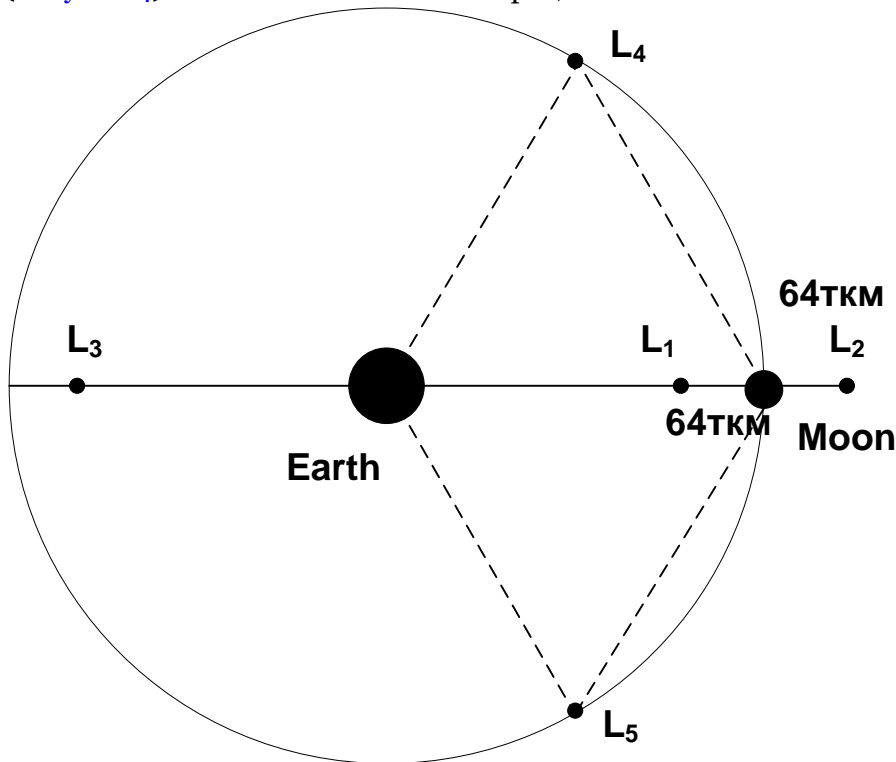


Рис. 4. Точки либрации СЗЛ

Точки либрации представляют собой частное решение задачи трёх тел. В этой задаче орбиты всех тел являются круговыми, а масса третьего тела намного меньше массы двух других. В этом случае считают, что два массивных тела обращаются вокруг их общего центра масс (барицентра) с постоянной угловой скоростью. Решение показывает, что в пространстве вокруг двух тел существуют пять точек, в которых третье тело с малой массой может оставаться неподвижным во вращающейся системе отсчёта (СЗЛ). В точках либрации гравитационные силы, действующие на малое тело, уравновешиваются центробежной силой.

На Рисунке 4 показаны пять точек либрации. Принципиальным является то, что эта система подвижная и рис.4 фиксирует, как фотоснимок, одно из возможных состояний СЗЛ. Три точки либрации находятся на линии, соединяющей Землю и Луну (ЛЗЛ), их называют коллинеарными точками либрации. Первая находится между Землей (Earth) и Луной (Moon), ее обозначают L_1 , вторая точка либрации находится за Луной – L_2 , и третья коллинеарная точка либрации - L_3 находится с обратной стороны Земли по отношению к Луне. Четвертая L_4 и пятая L_5 точки либрации находятся с двух сторон вне ЛЗЛ. Их называют треугольными точками либрации. Точки L_4 и L_5 называются треугольными или троянскими. Точки L_1 , L_2 , L_3 являются точками неустойчивого равновесия, в точках L_4 и L_5 равновесие устойчивое

Условность модели на Рисунке 4 в том, что орбита не является строго круговой. Поэтому исследование и поиск точек либрации является научной проблемой. Если поместить в любую точку либрации малое тело, то в рамках вот такой простой системы оно там останется. С физических позиций точка либрации подобна потенциальной яме.

В системе координат с началом отсчёта в центре масс системы и с осью, направленной от центра масс к менее массивному телу, координаты этих точек в первом приближении по a рассчитываются с помощью следующих формул^[2]:

$$\begin{aligned} r_1 &= (R [1-(a/3)^{1/3}], 0) \\ r_2 &= (R [1+(a/3)^{1/3}], 0) \\ r_3 &= (-R [1+(5a/12)], 0) \end{aligned}$$

$a=M_2/(M_1+M_2)$; R – расстояние между телами; M_1 – масса более массивного тела; M_2 – масса второго тела. Если M_2 много меньше по массе, чем M_1 , то точки L_1 и L_2 находятся на примерно одинаковом расстоянии r от тела M_2 , равном радиусу сферы Хилла

$$r \approx R(M_2/3 M_1)^{1/3}$$

где R – расстояние между компонентами системы

Если малое тело или КА выходит из этих точек, то в их окрестности оно может двигаться по периодическим орбитам (гало-орбитам, рис.5) (Zimovan, 2017). На Рисунке 5 в качестве условной единицы выбрано расстояние между Луной и Землей. Выделена линия Земля (Earth) – Луна (Moon) – (ЛЗЛ). Координатная (динамическая) система выбрана так, что одна ось (горизонталь) расположена вдоль направления ЛЗЛ, другая ось (вертикаль) нормально к ЛЗЛ.

Малое тело или КА могут двигаться вокруг точки либрации по таким орбитам. Для точек либрации L_1 , L_2 системы Земля – Луна период движения по этим орбитам будет порядка 12-14 суток.

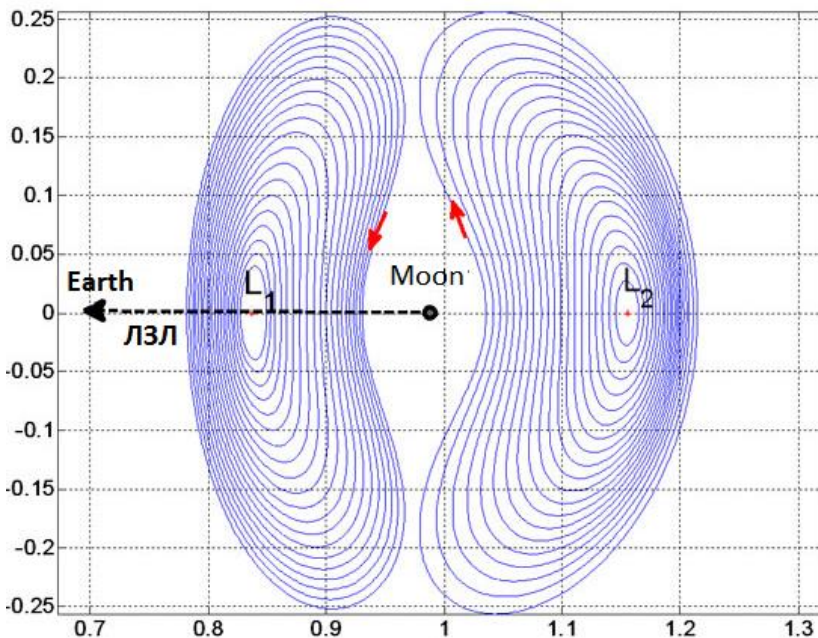


Рис. 5. Гало-орбиты СЗЛ

Оценки показывают, что размеры Гало орбит составляют около 0,2 вдоль ЛХЛ и около 0,5 нормально к ЛЗЛ. Следует отметить важный факт. На первый взгляд однородное пространство в СЗЛ становится неоднородным при учете гравитации и вращения больших тел. Поэтому траектории движения космических аппаратов надо выбирать так, чтобы они не попадали в область точек либрации. Точки либрации существуют не только в СЗЛ, но и в системе Солнце – Земля. Поэтому траектории движения КА надо выбирать с учетом этих точек. Точки либрации существуют в системе Солнце – Планета земной группы (Марс). Поэтому гало-орбиты для можно использовать для наблюдения за спутниками планет как относительно устойчивые траектории. Относительность обусловлена тем, что на космический аппарат будет действовать притяжение Солнца, давление солнечного света.

Для точек L_4 , L_5 существуют следующие оценки

$$r_4 = \left(\frac{R}{2} b, \frac{\sqrt{3}R}{2} \right)$$

$$r_5 = \left(\frac{R}{2}b, -\frac{\sqrt{3}R}{2} \right)$$

Точка либрации L_1 удобна для расположения в ней космических окололунных станций. Если станция находится в точке либрации, то переход из точки либрации на гало-орбиту позволяет лететь в любую точку на поверхности Луны. Следует отметить, что наличие точек либрации является характеристикой наличия в космическом пространстве энергетических тоннелей. Эти тоннели обеспечивают минимизацию затрат энергии при космических перемещениях (Рисунок 6).

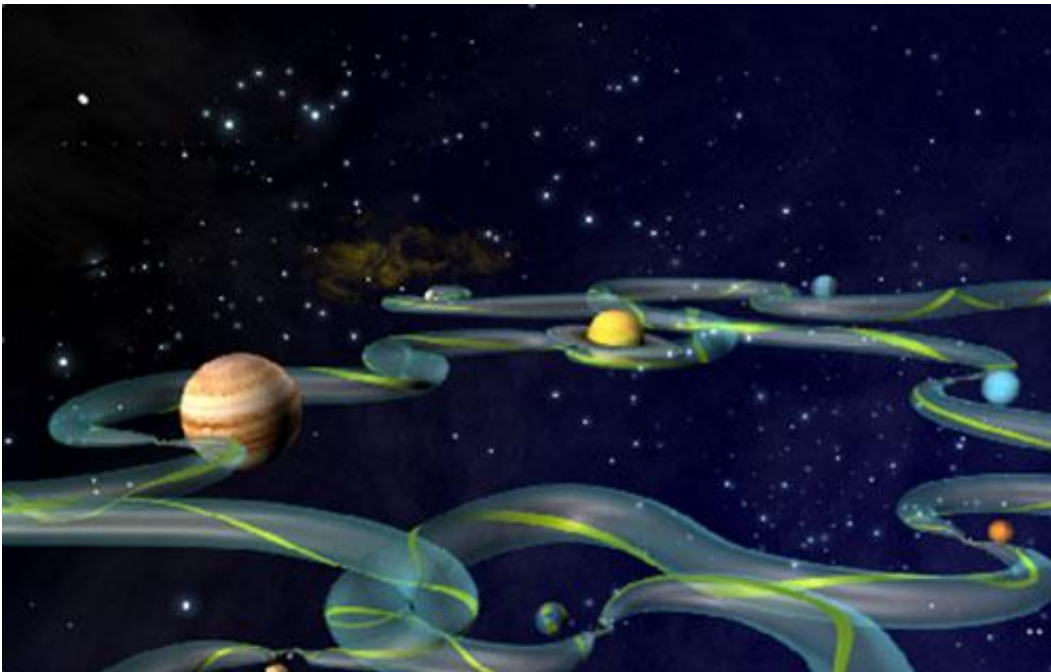


Рис. 6. Тоннельные переходы в Солнечной системе (рисунок из зарубежных публикаций)

Астрономы из Калифорнийского университета выяснили, что астероиды способны перемещаться в пространстве быстрее, чем дают баллистические расчеты. Результаты показали, что в Солнечной системе существуют «динамические каналы» (Рисунок 6), связанные друг с другом. Они простираются от пояса астероидов до Урана и далее. В таком «канале», объект под влиянием гравитации развивает высокую скорость и за несколько десятков лет способен всего преодолеть расстояние, на которое в ином случае ушли бы сотни тысяч или даже миллионы лет.

Система Солнце Земля оказывает влияние на систему Земля Луна. В Таблице 1 приведены характеристики двух двойных систем.

Таблица 1. Характеристики двойных систем.

Система	Солнце-Земля	Земля-Луна
Масса большего тела M (кг)	Солнце 1.991×10^{30}	Земля 5.98×10^{24}
масса меньшего тела m (кг)	Земля 5.98×10^{24}	Луна 7.35×10^{22}
Массовое отношение $m / (M + m)$	0,000 003	0,012
Расстояние $M - m$	149 600 000 км 1 AU	384.401 км
Расстояние $M - CM$	440 км	4667 км

Расстояние m – СМ	149,599,551 км 0,999 997 AU	379734 км
Расстояние L1 – m	1,501,557 км 0,010 037 AU	64499 км
Расстояние L2 – m	1,491,557 км 0,009 970 AU	58.006 км
Расстояние L3 – М	149,599,737 км 0,999 998 AU	381.678 км

В [Таблице 1](#) показаны характеристики двух двойных систем «Солнце-Земля» (ССЗ) и «Земля-Луна» (СЗЛ). Обращает внимание, что ССЗ точки либрации L1, L2 находятся в теле Земли. Это может привести к специфике Гало орбит. Не исключено что кольца мусора вокруг Земли находятся на гало орбитах системы *Солнце-Земля*.

3. Заключение

Проведенные исследования связаны с космической геоинформатикой ([Bondur, Tsvetkov, 2015](#)) и геодезической астрономией ([Gospodinov, 2018](#)). Движение Луны происходит вокруг барицентра, а не вокруг центра масс Земли. Вращение Система «Земля-Луна» связана с системой «Солнце-Земля», которая влияет на подлунное пространство и на околоземное пространство. Точки либрации делятся на устойчивые и неустойчивые. Устойчивые точки либрации выглядят привлекательным для строительства космических станций. Существует идея колонизации точек Лагранжа путем создания орбитальных станций в этих точках. Такие точки существуют у каждой планеты Солнечной системы. В треугольных точках либрации у Юпитера замечено скопление пыли. Не исключено, что точки либрации системы Солнце Земля способствуют образования колец мусора в околоземном пространстве.

Литература

- [Тихонов, Неверов, 2015](#) – Тихонов В.Е., Неверов А.А. Движение Земли вокруг барицентра Солнечной системы как информационная основа долгосрочного прогнозирования урожайности // *Аграрный вестник Урала*. 2015. № 12 (142).
- [Цветков, 2017](#) – Цветков В.Я. Модель информационной ситуации // *Перспективы науки и образования*. 2017. № 3(27). С. 13-19.
- [Bondur, Tsvetkov, 2015](#) – Bondur V.G., Tsvetkov V.Ya. New Scientific Direction of Space Geoinformatics // *European Journal of Technology and Design*. 2015. № 4 (10): 118-126.
- [Capdevila, Howell, 2018](#) – Capdevila L.R., Howell K.C. A transfer network linking Earth, Moon, and the triangular libration point regions in the Earth-Moon system // *Advances in Space Research*. 2018. Т. 62. № 7: 1826-1852.
- [Erdos, Turán, 1938](#) – Erdos P., Turán P. On Interpolation II: On the Distribution of the Fundamental Points of Lagrange and Hermite Interpolation // *Annals of Mathematics*. 1938. Pp. 703-724.
- [Gospodinov, 2018](#) – Gospodinov S.G. The Development of Geodesic Astronomy // *Russian Journal of Astrophysical Research. Series A*. 2018. 4(1): 9-33.
- [Jantsch et al., 2019](#) – Jantsch P., Webster C.G., Zhang G. On the Lebesgue constant of weighted Leja points for Lagrange interpolation on unbounded domains // *IMA Journal of Numerical Analysis*. Т. 39. 2: 1039-1057.
- [Jorba-Cuscó, 2018](#) – Jorba-Cuscó M., Farrés A., Jorba A. Two periodic models for the Earth-Moon system // *Frontiers in Applied Mathematics and Statistics*. Т. 4. P. 32.
- [Tyson, 2002](#) – Tyson N.G. The Five Points of Lagrange // *Natural history*. 2002. Т. 111. № 3. Pp. 44-48.
- [Zimovan, 2017](#) – Zimovan E.M. Characteristics and design strategies for near rectilinear halo orbits within the Earth-Moon system: diss. Purdue University, 2017.

References

- Bondur, Tsvetkov, 2015** – Bondur, V.G., Tsvetkov, V.Ya. (2015). New Scientific Direction of Space Geoinformatics. *European Journal of Technology and Design*. 4(10): 118-126.
- Capdevila, Howell, 2018** – Capdevila, L.R., Howell, K.C. (2018). A transfer network linking Earth, Moon, and the triangular libration point regions in the Earth-Moon system. *Advances in Space Research*. T. 62. 7: 1826-1852.
- Erdos, Turán, 1938** – Erdos, P., Turán, P. (1938). On Interpolation II: On the Distribution of the Fundamental Points of Lagrange and Hermite Interpolation. *Annals of Mathematics*. Pp. 703-724.
- Gospodinov, 2018** – Gospodinov, S.G. (2018). The Development of Geodesic Astronomy. *Russian Journal of Astrophysical Research. Series A*. 4(1): 9-33.
- Jantsch et al., 2019** – Jantsch, P., Webster, C.G., Zhang, G. (2019). On the Lebesgue constant of weighted Leja points for Lagrange interpolation on unbounded domains. *IMA Journal of Numerical Analysis*. T. 39. 2: 1039-1057.
- Jorba-Cuscó, 2018** – Jorba-Cuscó, M., Farrés, A., Jorba, A. (2018). Two periodic models for the Earth-Moon system. *Frontiers in Applied Mathematics and Statistics*. 4: 32.
- Tikhonov, Neverov, 2015** – Tikhonov, V.E., Neverov, A.A. (2015). Dvizhenie Zemli vokrug baritsentra Solnechnoi sistemy kak informatsionnaya osnova dolgosrochnogo prognozirovaniya urozhainosti [The movement of the Earth around the barycenter of the Solar system as an information basis for long-term forecasting of yield]. *Agrarnyi vestnik Urala*. 12 (142). [in Russian]
- Tsvetkov, 2017** – Tsvetkov, V.Ya. (2017). Model' informatsionnoi situatsii [Model of the information situation]. *Perspektivy nauki i obrazovaniya*. 3(27): 13-19. [in Russian]
- Tyson, 2002** – Tyson, N.G. (2002). The Five Points of Lagrange. *Natural history*. T. 111. 3: 44-48.
- Zimovan, 2017** – Zimovan, E.M. (2017) Characteristics and design strategies for near rectilinear halo orbits within the Earth-Moon system: diss. Purdue University.

Исследование системы «Земля-Луна»

Виктор Петрович Савиных ^{a, b, *}

- ^a Российская академия космонавтики им. К.Э. Циолковского (РАКЦ), Российская Федерация
^b Московский государственный университет геодезии и картографии, Российская Федерация

Аннотация. Статья исследует систему двух тел «Земля Луна». Показано, что как всякая система физических тел, данная система имеет общий центр масс или барицентр. Земля и Луна вращаются вокруг барицентра. Отмечена некорректность утверждения, что Луна вращается вокруг Земли. Луна вращается вокруг общего центра масс системы, который смещен по отношению к центру масс Земли, но находится в теле Земли. Оценены параметры орбит тел в системе Земля Луна. Высказана гипотеза что приливы и отливы происходят за счет суточного вращения Земли и смещения центра водной массы относительно барицентра. Описан феномен точек либрации в системе Земля Луна. Описаны устойчивые и неустойчивые точки либрации. Проведены расчеты точек либрации в системе Земля Луна и связанной с ней системы Солнце Земля. Отмечена целесообразность использования точек либрации для строительства космических станций. Высказана гипотеза, что точки либрации системы Солнце Земля могут способствовать образованию колец мусора в околоземном пространстве.

Ключевые слова: космические исследования, Земля, Луна, параметры орбит, барицентр, точки либрации, система Солнце Земля.

* Корреспондирующий автор
 Адреса электронной почты: president@miigaik.ru (В.П. Савиных)